

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Šćurić

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:
Doc. dr. sc. Branko Bauer

Student:
Ivan Šćurić

Zagreb, 2012.

Izjava

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, te uz pomoć stručne literature koja je navedena.

Zahvaljujem se mentoru doc.dr.sc. Branku Baueru, te isto tako i svim djelatnicima Katedre i Laboratorija za ljevarstvo na savjetima, uputstvima i komentarima pri izradi ovog rada te na stručnoj pomoći i suradnji.

Ivan Šćurić

U Zagrebu, rujan 2012.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA.....	III
SAŽETAK	IV
1. UVOD	1
2. OPĆENITO O LJEVARSTVU	3
2.1. Postupci lijevanja.....	5
2.2. Kalup	5
2.2.1. Jednokratni kalupi	6
2.2.2. Stalni kalupi.....	7
2.3. Uljevni sustav	8
2.3.1. Elementi uljevnog sustava	9
2.4. Lijevanje u pijesak	10
2.5. Proizvodni proces u ljevaonici	10
2.6. Kontrola kvalitete odljevaka.....	11
2.6.1. Greške na odljevcima.....	11
2.6.2. Podjela grešaka	12
3. SIVI LIJEV	13
3.1. Skrućivanje sivog lijeva	14
3.2. Morfologija grafita u sivom lijevu	15
3.3. Utjecaj kemijskog sastava na mikrostrukturu i svojstva sivog lijeva	17
3.3.1. Utjecaj stalnih elemenata	17
3.3.2. Utjecaj legirajućih elemenata	18
3.3.3 Utjecaj pratećih elemenata.....	19
3.4. Proizvodnja taljevine sivog lijeva	20
3.4.1. Uložni materijali.....	20
3.4.2. Taljenje	22
3.5. Svojstva sivog lijeva	22
3.5.1. Mehanička svojstva	23
3.5.2. Fizikalna svojstva	25
3.6. Legirani sivi ljevovi	25
3.6.1. Sivi ljevovi legirani silicijem	26

3.6.1.1. Sivi lijev legiran silicijem namijenjen za rad na povišenim temperaturama	26
3.6.1.2. Sivi ljevovi legirani silicijem otporni na koroziju	26
3.6.2. Sivi ljevovi legirani niklom	27
3.6.3. Sivi ljevovi legirani aluminijem.....	27
3.7. Kontrola kvalitete.....	28
3.7.1. Kontrola kvalitete taljevine	28
3.7.2 Kontrola kvalitete odljevaka.....	29
4. EKSPERIMENTALNI DIO.....	30
4.1. Vizualna kontrola.....	33
4.2. Metalografska ispitivanja	33
4.2.1. Priprema uzoraka.....	33
4.2.2. Ispitivanje mikroskopom	36
4.3. Ispitivanje tvrdoće.....	37
4.4. Ispitivanje čvrstoće	39
5. REZULTATI ISPITIVANJA.....	40
5.1 Rezultati metalografskih ispitivanja	40
5.2. Rezultati ispitivanja tvrdoće	43
5.3. Rezultati ispitivanja čvrstoće	44
6. ZAKLJUČAK.....	46

POPIS SLIKA

Slika 1. Lijevanje metala u kalup	2
Slika 2. Primjena odljevaka u automobilske industriji (blok motora).....	4
Slika 3. Prikaz učešća odljevaka u pojedinim granama strojogradnje	4
Slika 4. Osnovna obilježja pješanog kalupa.....	6
Slika 5. Sabijanje jednokratnog pješanog kalupa.....	7
Slika 6. Uljevanje taljevine u stalni kalup	8
Slika 7. Osnovne komponente uljavnog sutava	9
Slika 8. Prikaz procesa u ljevaonici pri lijevanju u pješčane kalupe.....	11
Slika 9. Struktura proizvodnje željeznih odljevaka: a) u svijetu 2005. godine, b) u ...	13
Hrvatskoj 2006. godine	13
Slika 10. Odljevci od sivog lijeva: a) blok motora, b) glava motora	14
Slika 11. Ravnotežni dijagram stanja Fe-C do 5,0% C	14
Slika 12. Tipovi listićavog grafita prema ASTM A 247: a) tip A, b) tip B, c) tip C, d) tip D, e) tip E.....	16
Slika 13. Krivulja naprezanje - istezanje za različite kvalitete sivog lijeva.....	24
Slika 14. Odnos vlačne čvrstoće i tvrdoće kod različitih kvaliteta sivog lijeva.....	24
Slika 15. Spektrometar za određivanje kemijskog sastava	29
Slika 16. Prikazuje presjek uzorka kalupa	30
Slika 17. Prikaz kalupa	31
Slika 18. Prikaz kalupa	31
Slika 19. Kalup nakon uljevanja taljevine	32
Slika 20. Prikaz mjesta gdje je rezan uzorak	33
Slika 21. Izdvojeni uzorak za ispitivanje.....	34
Slika 22. Stroj za brušenje uzoraka	35
Slika 23. Ultrazvučna čistilica	35
Slika 24. Uređaj za poliranje	36
Slika 25. Svjetlosni mikroskop	36
Slika 26. Mikroskopski prikaz na računalu	37
Slika 27. Tvrdomjer za ispitivanje tvrdoće uzoraka.....	38
Slika 28. Uzorak iz norme EN 1561 sa dimenzijama d1=20mm	39
Slika 29. Mikrostruktura sivog lijeva EN GJL 200 (povećanje 100x).....	40
Slika 30. Mikrostruktura sivog lijeva EN GJL 200 (povećanje 200x).....	41

Slika 31. Mikrostruktura sivog lijeva EN GJL 200 (povećanje 500x).....	42
Slika 32. Prikaz uzorka nakon ispitivanja čvrstoće	44
Slika 33. Prikaz uzorka nakon ispitivanje čvrstoće	45

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prednosti i nedostaci lijevanja.....	3
Tablica 2. Utjecaj dodataka legirajućih elemenata na tvrdoću SL.....	19
Tablica 3. Prikaz rezultata ispitivanja tvrdoće uzoraka.....	43

SAŽETAK

Rad se sastoji od dva dijela: teoretskog i eksperimentalnog.

U teoretskom dijelu obrađena je tehnologija lijevanja, što uključuje postupke lijevanja, definiciju i podjelu kalupa te uljevni sustav. Objašnjeno je i lijevanje u pijesak te greške na odljevcima. Posebno je objašnjen sivi ljev, njegova svojstva te utjecaj drugih elemenata na njegov kemijski sastav. Isto tako, obrađena je taljevina sivog lijeva te legirani sivi ljevovi.

U eksperimentalnom dijelu ovog rada provedena su ispitivanja svojstava sivog lijeva. Ispitana je mikrostruktura pomoću optičkog mikroskopa, tvrdoća pomoću tvrdomjera te čvrstoća. Na temelju rezultata mikrostrukture, čvrstoće i tvrdoće zaključeno je da se radi o sivom lijevu EN-GJL-200 (SL 20).

1. UVOD

Proizvodnja metalnih predmeta lijevanjem, odnosno proizvodnja metalnih odljevaka jedan je od najstarijih i najučinkovitijih postupaka oblikovanja proizvoda. Najstariji pronađeni lijevani predmeti datiraju iz perioda oko 4500 godina prije nove ere.

Lijevanje je tehnologija oblikovanje predmeta od metala ulijevanjem taljevine u kalupe. Taljevina poprima oblik i dimenzije kalupne šupljine i zadržava ga nakon skrućivanja. Lijevanje je vrlo pogodno za serijsku i masovnu proizvodnju obzirom na visoku produktivnost i laku mogućnost izrade replika. Zbog velike proizvodnosti pogodno je i za automatizaciju. Tehnologija lijevanja često je i jedina primjerena za izradu vrlo složenih dijelova s unutarnjim šupljinama, isto tako i za masivna kućišta strojeva. Tehnologijom lijevanja moguće je dijelove strojeva koji bi se inače morali raditi iz više komada, odliti u jednom. Oblikovanje se obavlja u tekućem stanju, a taljevina, kao i sve tekućine, zahtjeva minimalni utrošak energije za promjenu oblika, pogotovo iz razloga što se kao uljevna sila koristi gravitacija. Ukupni utrošak energije ipak je znatan, budući da materijal treba prethodno rastaliti. Iskorištenje energije bit će povoljnije što je oblik složeniji, budući da utrošena energija ovisi o utrošenoj masi, a ne o složenosti oblika. Zbog toga je lijevanje nenadomjestiva tehnologija kod izrade proizvoda složenog oblika. Moguće je ostvariti visoku proizvodnost obzirom da je vrijeme skrućivanja vrlo kratko.

Glavni cilj ljevača je postizanje konzistentne visoke kvalitete i zahtijevanih svojstava odljevaka uz što niže proizvodne troškove. Međutim, lijevanje metala kompleksan je postupak i često mogu nastupiti neočekivani rezultati budući da se vrlo velik broj faktora mora kontrolirati. Kvaliteta uložениh materijala, proces taljenja i obrade taljevine, metalurško stanje i čistoća taljevine, temperatura i brzina lijevanja, kvaliteta kalupa, uljevni sustav i sustav napajanja odljevka itd. samo su neki od faktora koji utječu na konačnu kvalitetu i svojstva odljevaka. [1,2,3]

Slika 1 prikazuje ulijevanje metala u kalup.



Slika 1. Lijevanje metala u kalup [2]

2. OPĆENITO O LJEVARSTVU

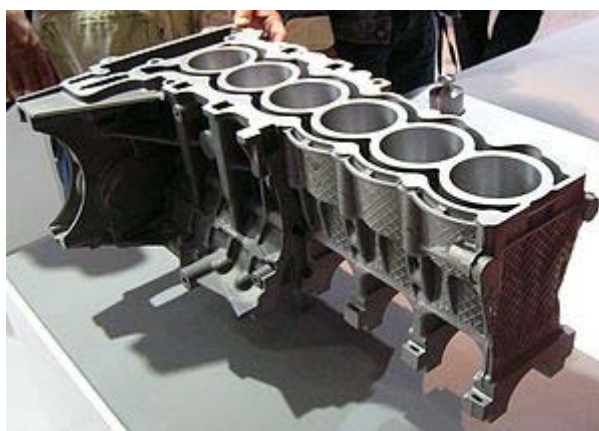
Ljevarstvo danas predstavlja sumu znanja s područja znanstvenih i tehničkih disciplina. Ljevački postupci usavršavani su saznanjima iz područja kemije, fizike, metalurgije, mineralogije, strojarstva, elektrotehnike i metalurgije što je dovelo do brzog razvoja proizvodnje odljevaka. [1]

Najveća primjena odljevaka je u automobilskoj industriji u obliku lijevanog željeza ili aluminijskog lijeva, npr. u jedan automobil ugrađeno je više od 100 odljevaka. Isto tako odljevci se koriste u strojogradnji, građevinskoj industriji, medicini, brodogradnji, za željeznička vozila, energetici, zračnoj i svemirskoj industriji, kao i kod lijevanja umjetničkih skulptura. [1]

Tablica 1. Prednosti i nedostaci lijevanja [7]

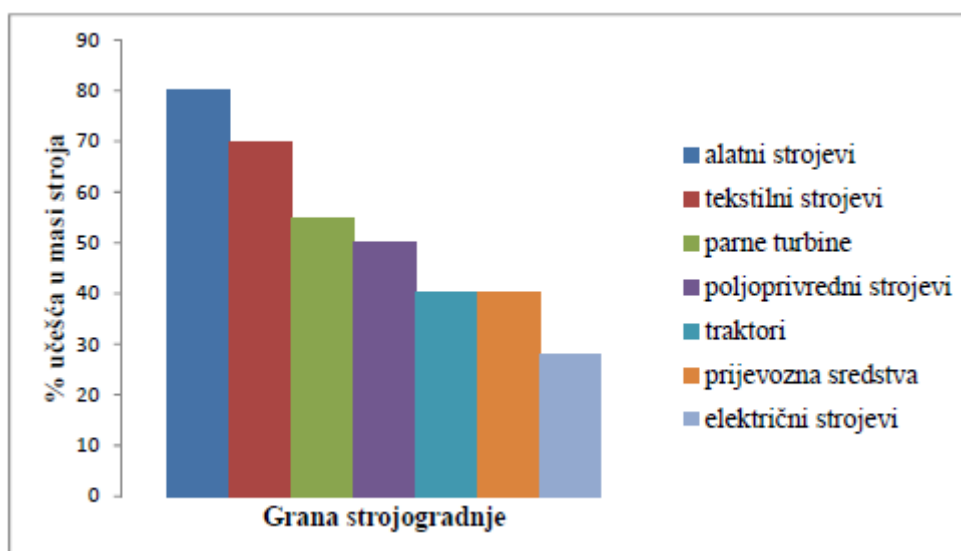
PREDNOSTI	NEDOSTACI
složena geometrija vanjskog i unutarnjeg dijela	ograničenja u mehaničkim sredstvima, poroznost
moguće je dobiti dimenzijski točan oblik (net shaped) ili približno točan oblik	dimenzijska točnost, kvaliteta površine
moguće proizvesti vrlo velike odljevke	opasnost u proizvodnji
može se lijevati bilo koji metal	utjecaj na okoliš
moguća masovna proizvodnja	
veliki raspon dimenzija odljevaka- od 1g do 250t	

Na slici 2 vidi se tipičan primjer odljevka u automobilskoj industriji.



Slika 2. Primjena odljevaka u automobilskoj industriji (blok motora) [5]

Slika 3 prikazuje učešće pojedinih odljevaka u granama strojogradnje.



Slika 3. Prikaz učešća odljevaka u pojedinim granama strojogradnje [1]

2.1. Postupci lijevanja

Proces lijevanja može se podijeliti obzirom na vrstu kalupa:

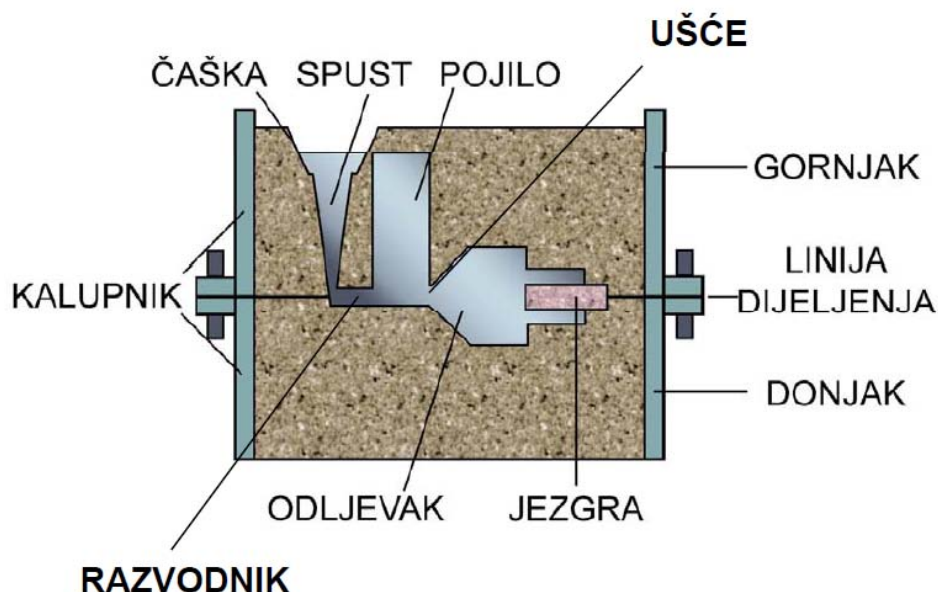
- lijevanje u jednokratne kalupe:
 - lijevanje u pijesak
 - školjkasti lijev
 - lijevanje u pune kalupe
 - točni(precizni)lijev
 - lijevanje u kalupe od gipsa
 - lijevanje u keramičke kalupe
 - vakuumsko kalupljenje pijeska
- lijevanje u stalne kalupe:
 - kokilni lijev
 - tlačni lijev
 - centrifugalni lijev.

2.2. Kalup

Kako bi se izradio odljevak taljevina se mora uliti u oblik koji odgovara izgledu odljevka. Nakon skrućivanja i hlađenja taljevine dobije se oblikovani proizvod. Ovako oblikovan proizvod naziva se odljevak, a zapremnina u kojoj se oblikuje naziva se kalup. Dakle, kalup je zapravo alat kojim se oblikuje odljevak. Pomoću kalupa ne oblikuje se samo vanjski oblik odljevka, nego se pogodnim umecima koje se nazivaju jezgre, odmah pri ulijevanju formiraju unutarnje šupljine i kanali u odljevku. Razlikuju se dvije vrste kalupa: jednokratni i stalni kalupi. Kod lijevanja u stalne kalupe pomoću jednog kalupa oblikuje se veliki broj odljevaka, dok se kod lijevanja u jednokratne kalupe za izradu svakog pojedinog odljevka mora svaki puta izraditi novi kalup tj. kalup je jednokratno upotrebljiv. Ovisno o veličini odljevka, jedan kalup može sadržavati jedan ili više odljevaka. Kalupi su u pravilu dvodijelni: stalni, zato da bi se mogao izvaditi odljevak nakon ulijevanja i hlađenja odljevka u kalupu, a jednokratni da bi se mogao izvaditi model iz kalupa nakon završenog kalupljenja. Izbor stalnog ili jednokratnog kalupa vrlo je složen, a ovisi o tehnološkim i ekonomskim kriterijima, od kojih su najznačajniji vrsta legure koju lijevamo

te veličina serije. Kalup mora biti izrađen od materijala temperaturno višestruko otpornijeg nego što je lijevana legura. Zbog toga se odljevci od legura višeg tališta (npr. sivi, žilavi, čelični, legirani lijev), lijevaju u jednokratne kalupe. [1,4]

Na slici 4 prikazana su osnovna obilježja pješčanog kalupa



Slika 4. Osnovna obilježja pješčanog kalupa [7]

2.2.1. Jednokratni kalupi

Jednokratni kalupi danas su najprošireniji tip kalupa, poglavito kod lijevanja željeznih legura. Materijal od kojeg se izrađuju jednokratni kalupi naziva se kalupna mješavina, a izrada se naziva kalupljenje. Kalupna mješavina mora imati zahtjevana tehnološka svojstva kao što su: čvrstoća, propusnost, oblikovnost, termootpornost, kalupivost, vatrostalnost i rasipljivost. Kalupna mješavina dobije se miješanjem osnovnog materijala, vezivnog sredstva i posebnih dodataka. Osnovni materijal može biti kvarcni ili kremeni pijesak. Najviše se upotrebljava kvarcni (kremeni) pijesak jer ga ima u velikim količinama gotovo u svim zemljama. Kao vezivo koristi se glina, cement, vodeno staklo, fenolne ili furanske smole. Dodaci mogu biti kameni ugljen, grafit, koksni prah ili smola. Sastav kalupne mješavine ovisi od načina izrade kalupa, vrste legure i dimenzija odljevka. Tipična kalupna mješavina sastoji se od 90% pijeska, 3% vode i 7% gline i dodataka. [1,4]

Osnovna svojstva jednokratnih kalupa su:

- kalupe je potrebno nakon lijevanja uništiti kako bi se izvadio odljevak,
- kalupni materijali je pijesak, gips i slični materijali plus vezivo i dodaci,
- koristi se za složenije oblike odljevaka i konstrukcijskih elemenata.

Slika 5 prikazuje sabijanje jednokratnog pješčanog kalupa.



Slika 5. Sabijanje jednokratnog pješčanog kalupa [6]

2.2.2. Stalni kalupi

Stalni kalupi mogu se primijeniti više puta. U takvim se kalupima izrađuje velik broj odljevaka. Stalni kalup ima dobru toplinsku provodljivost, pa skrućivanje metala teče brzo. Struktura odljevka je zato finožrnata i gusta. Lijevanje u metalne kalupe zahtijeva manju radnu površinu nego li lijevanje u pijesak jer otpada manipulacija velikim brojem kalupnika i pijeska. Proces lijevanja u stalne kalupe može se mehanizirati i automatizirati. Zbog velikih troškova izrade upotrebljavaju se kod većih serija odljevaka. Za vrijeme rada kalupi su izloženi visokim toplinskim opterećenjima. Oni se za vrijeme ulijevanja taljevine naglo zagrijevaju, a nakon vađenja odljevka naglo se hlade. Da bi kalupi mogli podnositi veliku promjenu toplinskog opterećenja, oni trebaju biti izrađeni od materijala koji ima potrebnu toplinsku vodljivost i otpornost prema habanju. Stalni kalupi izrađuju se od sivog lijeva ili legiranog čelika. U novije vrijeme za izradu kalupa upotrebljavaju se i neke legure aluminija i bakra. Kalupi za kokilni lijev često se izrađuju i od grafita. Odabir materijala za izradu kalupa ovisi o vrsti legure koja se lijeva. [1,4]

Osnovna svojstva stalnih kalupa:

- kalup se koristi više puta za proizvodnju velikog broja odljevaka,
- kalup je izrađen od metala ili rjeđe od grafita za čelične odljevke,
- ograničeni broj odljevaka,
- trajni kalupi su isplativiji u velikoserijskoj proizvodnji.

Slika 6 prikazuje ulijevanje taljevine u stalni kalup.



Slika 6. Uljevanje taljevine u stalni kalup [6]

2.3. Uljevni sustav

Uljevni sustav je mreža kanala preko kojih se taljevina dovodi u kalupnu šupljinu, tako da se postigne popunjavanje u što kraćem roku, sa što manjim pregrijanjem, što mirnijim strujanjem i uz što manji utrošak materijala. Pravilno konstruiran uljevni sustav mora zadovoljiti niz kriterija:

- brzo popunjavanje kalupne šupljine
- minimalizacija turbulencije
- izbjegavanje erozije kalupa i jezgara
- uklanjanje troske, metalnih oksida i uključaka prije ulaza u kalupnu šupljinu
- spriječavanje zahvaćanja zraka i uklanjanje plinova iz kalupne šupljine
- izbjegavanje deformacije odljevaka

- stvaranje pogodnih toplinskih gradijenata
- omogućavanje proizvodnje odljevaka uz korištenje minimlane količine metala
- ekonomičnost ukljanjanja uljevnog sustava
- kompatibilnost s postojećim načinom kalupovanja i lijevanja.

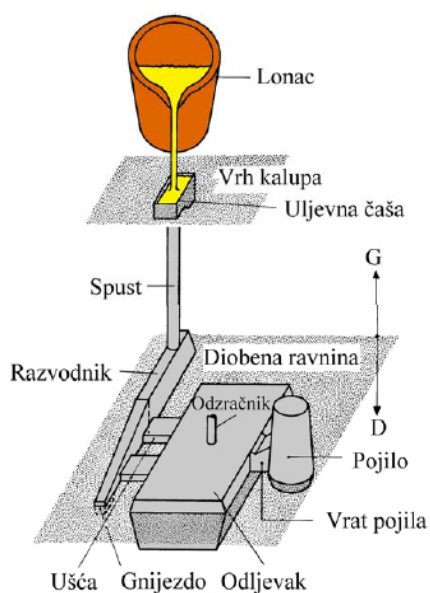
2.3.1. Elementi uljevnog sustava

Kanali kojima teče taljevina za vrijeme punjenja kalupne šupljine, tj. lijevanja, čine elemente uljevnog sustava.

Elementi uljevnog sustava jesu:

- uljevna čaša,
- spust,
- podnožje spusta,
- razvodnik,
- ušće (ušća),
- odzračnik (odzračnici).

Svaki od dijelova ima određenu funkciju. Lošom konstrukcijom uljevnog sustava može nastupiti uvlačenje plinova (zraka) i pojava oksidacije uslijed turbulentnog protjecanja. Na slici 7 su prikazane osnovne komponente uljevnog sustava.



Slika 7. Osnovne komponente uljevnog sustava [3]

2.4. Lijevanje u pijesak

Najrašireniji postupak lijevanja jest lijevanje u pijesak zbog mogućnosti izrade odljevaka različitih dimenzija, mogućnosti lijevanja više komada istovremeno u jednom kalupu, primjenjiv je za lijevanje gotovo svih materijala, te primjene od pojedinačne do masovne proizvodnje. Budući da pješčani kalupi omogućuju nesmetano skupljanje metala, tijekom skrućivanja odljevka smanjena je mogućnost nastajanja pukotina. Alatni troškovi su niski, međutim zbog velikog udjela ručnog rada direktni troškovi rada su visoki. [1,4,9]

Vrste kalupa koje se primjenjuju za pješčani lijev su:

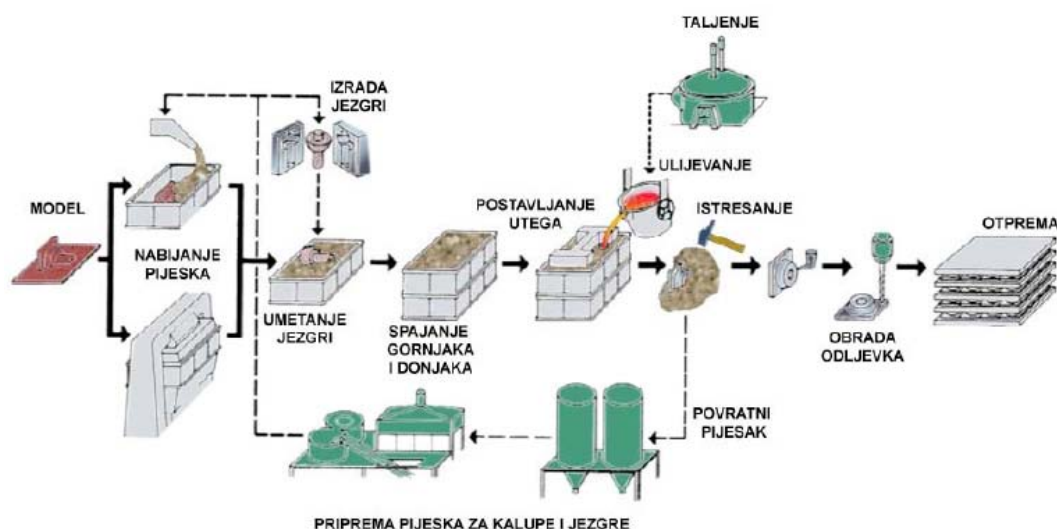
- kalup od vlažnog pijeska (mješavina pijeska, gline i vode)
- kalup od suhog pijeska (umjesto gline koriste se organska veziva)
- površinski osušen kalup (površina kalupne šupljine od vlažnog pijeska suši se pomoću plamenika ili lampi).

2.5. Proizvodni proces u ljevaonici

Proizvodni proces lijevanja u pješčane kalupe u ljevaonici sastoji se od:

1. Ulijevanja metala u pješčani kalup
2. Skrućivanja metala
3. Istresanje kalupa kako bi se izvadio odljevak
4. Čišćenja i pregledavanja odljevka
5. Primjena naknadne toplinske obrade (po potrebi) u svrhu poboljšanja svojstava odljevka.

Na slici 8 prikazan je proces u ljevaonici pri lijevanju u pješčane kalupe.



Slika 8. Prikaz procesa u ljevaonici pri lijevanju u pješčane kalupe [7]

2.6. Kontrola kvalitete odljevaka

Kada završe sve faze izrade odljevka, kreće kontroliranje njegovih karakteristika koje su bitne za njegovu upotrebljivost. Razni su zahtjevi kvalitete, oni ovise o namjeni odljevka. Samo vizualna kontrola može se provesti na odljercima na kojima se zahtjeva samo točnost osnovnog oblika. Kontrola mjerenje provodi se kada postoji zahtjev za dimenzijskom točnosti. Laboratorijska ispitivanja potrebno je provesti ukoliko su potrebna ostala svojstva, primjerice kemijski sastav, mehanička svojstva, mikrostruktura nepropusnost i slično.

2.6.1. Greške na odljercima

U tehnološkom procesu proizvodnje odljevaka postoji mnogo mogućnosti za nastankom greške, obzirom na materijal i postupke kojima se provodi lijevanje. Više različitih grešaka može uzrokovati jedan uzrok, a ista greška može biti prouzrokovana djelovanjem različitih uzroka ili njihovom kombinacijom. Zadatak je da se što jasnije definiraju vrste pogreške, njihov uzrok i ovisno o tome razvijanje rješenja. Današnjim naprednim metodama simulacija ulijevanja i skrućivanja dovedeno je do velikih ušteda, budući da se greške otkrivaju na još virtualnom modelu u fazi tehnološke izrade. U većini slučajeva moguće je pravilnim preoblikovanjem uljevnog sustava (ili modela) ispraviti pogrešku. Greške u odljercima smanjuju njihovu funkcionalnost i životni vijek. Postoje i greške koje ne utječu na funkcionalnost odljevka, međutim narušavaju estetski

izgled. Većina takvih može se jednostavno korigirati sačmarenjem ili brušenjem. Pojedine greške koje su na nepristupačnim mjestima te ih je zato teško ukloniti, mogu biti prihvatljive na određenim lokacijama.

2.6.2. Podjela grešaka

Svaka ljevačka pogreška ima standardnu oznaku. Oznaka se sastoji od slova i brojeva, koji predstavljaju klasu pogreške, vrstu lijeva i postupak lijevanja. Pri označavanju pogreške uzima se u obzir materijal od kojeg se izrađuje odljevak i postupak lijevanja. S obzirom na vrstu, veličinu i položaj u odljevku, greške se mogu podijeliti u nekoliko osnovnih grupa.

Kategorije grešaka su:

- metalne izrasline (zadebljanja)
- šupljine
- diskontinuiteti (napukline)
- površinske greške
- nepotpuni odljevci
- netočne dimenzije ili oblik
- uključci i nepravilnosti u strukturi.

Metode za detekciju i analizu grešaka na odljercima su:

- uobičajene metode kontrole odljevaka:
 - vizualna kontrola
 - kontrola dimenzija odljevaka
 - kontrola mase odljevaka
 - ispitivanje tvrdoće odljevaka
- ispitivanje tekućim penetrantom
- ispitivanje feromagnetnim prahom
- ispitivanje vrtložnim strujama
- radiografsko ispitivanje
- ispitivanje ultrazvukom.

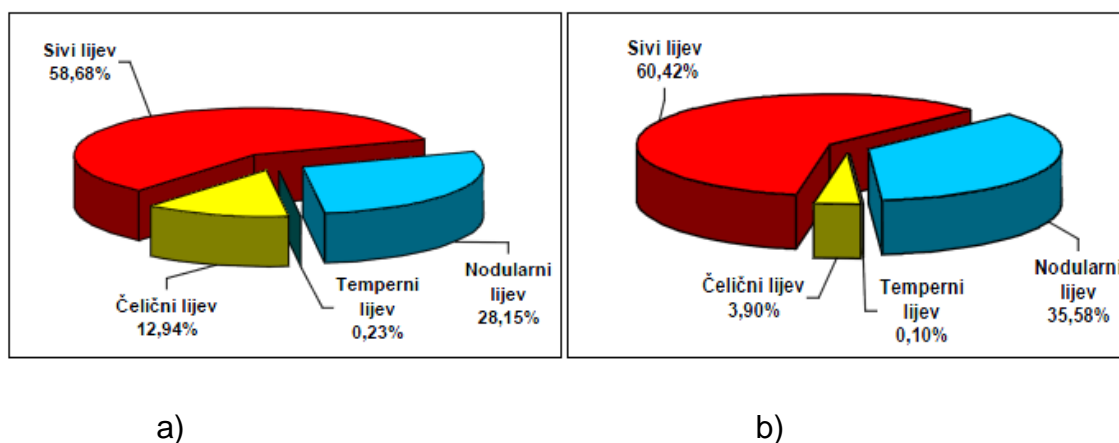
3. SIVI LIJEV

Sivi lijev pripada skupini željeznih ljevova kod kojih je ugljik izlučen u obliku grafita. Zbog grafitne listićave strukture, sivi lijev ima nisku vlačnu čvrstoću, tvrdoću, žilavost, istezanje i modul elastičnosti te povećanu osjetljivost na debljinu stijenke. Pozitivne strane sivog lijeva su: dobra strojna obradivost, visok stupanj prigušenja vibracija, otpornost na toplinske šokove (visoka toplinska vodljivost), izvanredna livljivost, te tlačna čvrstoća i ekonomičnost.

Tipična mikrostruktura sivog lijeva sastoji se perlitno-feritne metalne osnove i grafitnih listića. Budući da grafitni listići prekidaju kontinuitet metalne osnove, odnosno djeluju kao zarezi u metalnoj osnovi, mehanička svojstva sivog lijeva uvelike ovise o količini, obliku, veličini i raspodjeli grafita. Podaci iz 2005. godine nam ukazuju da je te godine proizvedeno 40,9 milijuna tona odljevaka od sivog lijeva, što je 58,68 % od ukupne količine proizvedenih odljevaka od željeznih ljevova. U Hrvatskoj je tijekom 2006. godine proizvedeno 30972 tona odljevaka od sivog lijeva, što iznosi 60,4 % u ukupnoj količini proizvedenih željeznih odljevaka.

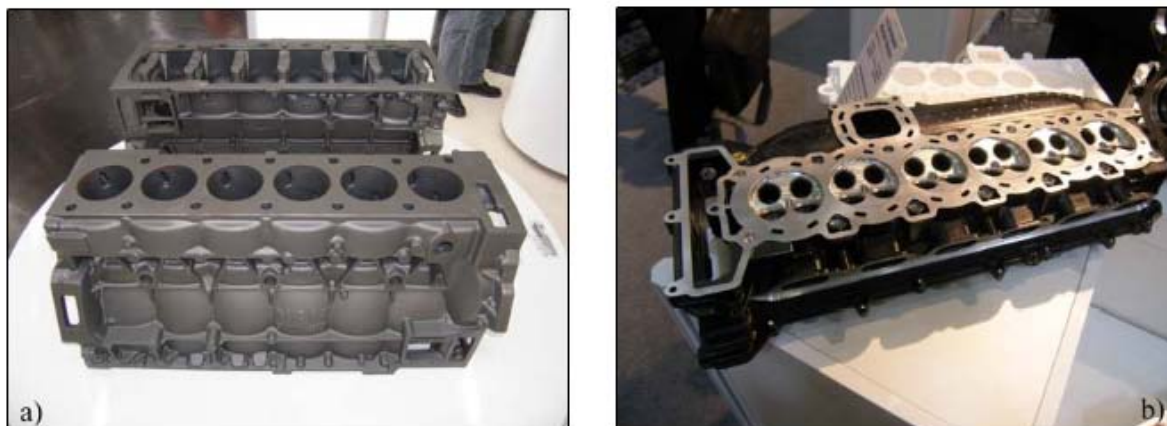
Tipična područja primjene sivog lijeva su: strojogradnja (postolja i dijelovi strojeva, kućišta), odljevci za peći i štednjake, konstrukcije, armature za vodovodne sustave, procesna industrija i energetika, industrija motornih vozila (cilindri, klipni prstenovi, blokovi i glave motora, kočioni diskovi, razni zupčanci, dekorativni odljevci (ukrasni stupovi, stupovi rasvjete itd.) i još mnoga druga područja. [8,9,10]

Na slici 9 je prikazana struktura proizvodnje željeznih odljevaka kako u svijetu tako i u Hrvatskoj.



Slika 9. Struktura proizvodnje željeznih odljevaka: a) u svijetu 2005. godine, b) u Hrvatskoj 2006. godine [8]

Na slici 10 su prikazani tipični odljevci sivog lijeva.

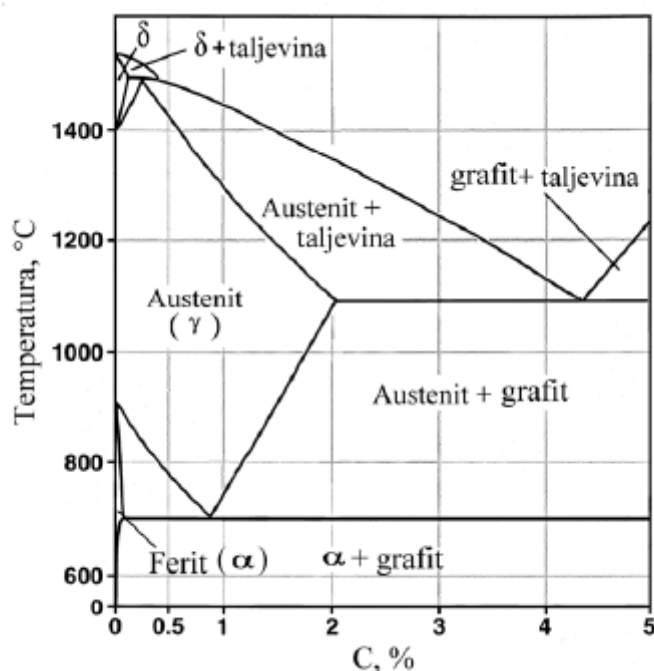


Slika 10. Odljevci od sivog lijeva: a) blok motora, b) glava motora [8]

3.1. Skrućivanje sivog lijeva

Ravnotežni dijagram Fe-C je osnova za proučavanje skrućivanja željeznih ljevova s grafitom. Sivi lijev, kao i ostale željezne ljevove s grafitom, karakterizira postojanje eutektičke reakcije.

Slika 11 prikazuje ravnotežni dijagram stanja Fe-C do 5,0% C



Slika 11. Ravnotežni dijagram stanja Fe-C do 5,0% C [8]

Od svih prisutnih elemenata u sivom lijevu (osim ugljika), silicij ima najveći utjecaj na sadržaj ugljika u eutektiku. Povećanjem sadržaja silicija eutektik se pomiče ka nižim sadržajima ugljika. Utvrđeno je da 1% silicija snižava eutektički sastav za 0,31% ugljika. Zbog toga se uvodi ekvivalent ugljika (CE) ili stupanj zasićenja S_c :

$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} \quad (1)$$

$$S_c = \frac{\%C}{4,26 - 1/3(\%Si + \%P)} \quad (2)$$

Kada je CE jednak 4,3, govori se o eutektičkom sastavu. Ukoliko je vrijednost CE ekvivalenta $<4,3$, radi se o podeutektičkom sastavu. U tom slučaju prva faza koja nastaje pri skrućivanju je austenit. Ako je vrijednost $CE > 4,3$, radi se o nadeutektičkom sastavu. Tada je prva faza koja se izlučuje tijekom skrućivanja primarni grafit.

Kada je $S_c = 1$ govori se o eutektičkom sastavu. Kada je $S_c < 1$ tada je podeutektički sastav, a kada je $S_c > 1$ radi se o nadeutektičkom sastavu. [8,12]

3.2. Morfologija grafita u sivom lijevu

Mehanička i fizikalna svojstva sivog lijeva jednim dijelom ovise o obliku, veličini, količini i raspodjeli grafitnih listića. Distribucija, tip i veličina grafitnih listića ovisi o temperaturi i brzini skrućivanja taljevine te nukleacijskom potencijalu taljevine. Prema normi ASTM A 247 listićavi grafiti podijeljeni su u 5 klasa (tipova).

Tip A grafitnih listića ima jednako raspodijeljene grafitne listiće. Karakterističan je za taljevine sivog lijeva kada se skrućivanje odvija sporo uz postojanje ravnotežnih uvjeta. Ovaj tip grafita se teško ostvaruje, naročito kod odljevaka različitih debljina stjenki. Uz tip A grafitnih listića ostvaruju se optimalna fizikalna i mehanička svojstva.

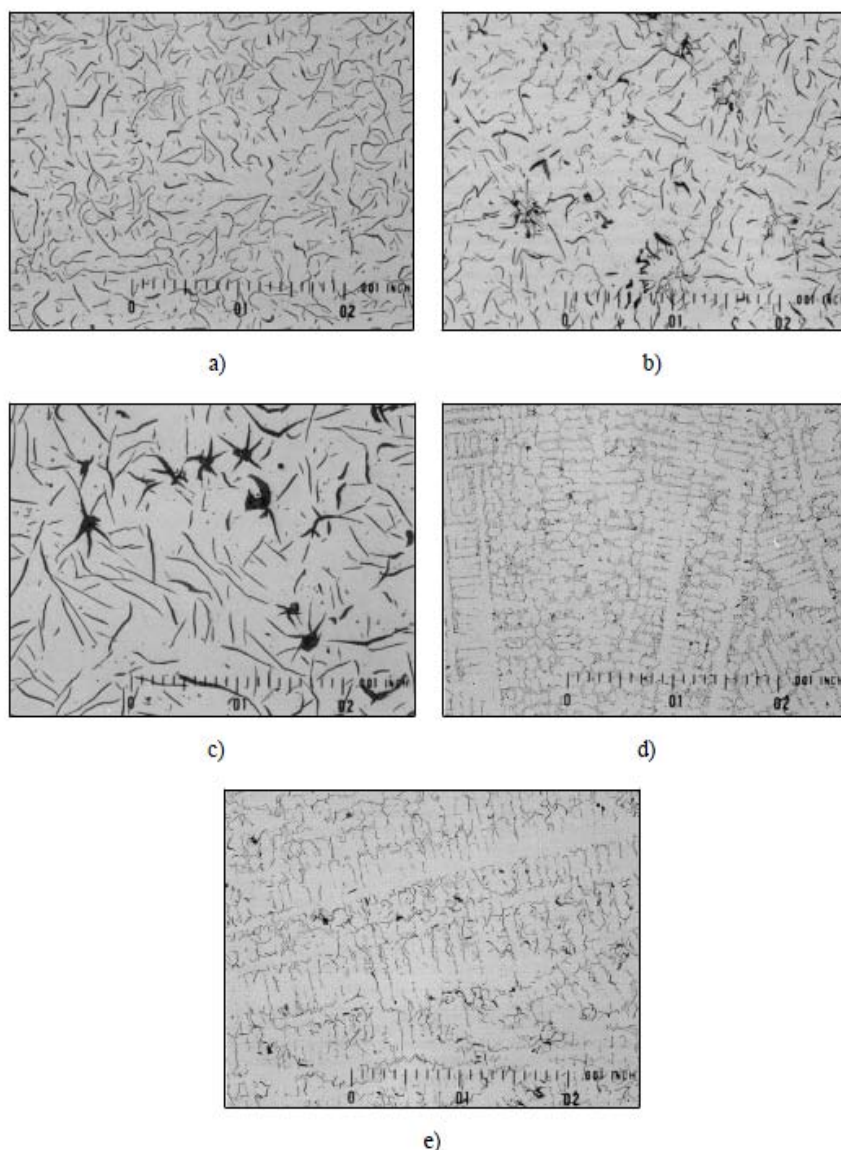
Kada se skrućivanje odvija pri nižim temperaturama od ravnotežne temperature skrućivanja nastaje tip B grafitnih listića. Kod iste debljine stjenke i kemijskog sastava, odljevak sivog lijeva B tip će imati manju tvrdoću od odljevka s tipom A grafitnih listića male veličine.

Tip C grafitnih listića se pojavljuje u nadeutektičkim sivim ljevovima, posebno gdje je sadržaj ugljika visok. Prisustvo C tipa grafitnih listića u mikrostrukтури značajno smanjuje

čvrstoću i tvrdoću odljevka. Poželjan je za lijevanje odljevaka kod kojih je potrebna naizmjenična visoka otpornost na hlađenje i grijanje i visoka sposobnost prigušenja vibracija, a ne čvrstoća.

Grafitni listići D i E kad je pothlađenje taljevine dosta visoko, ali ne toliko da dođe do stvaranja karbida. Uz ovakve oblike grafita (izrazito sitni i razgranati listići) pojavljuje se ferit u mikrostrukturi. Zbog nastanka ferita u metalnoj osnovi dolazi do značajnog pada vlačne čvrstoće, ali i znatno poboljšanje strojne obradivosti.[8,9,12]

Slika 12 prikazuje tipove listićavog grafita.



Slika 12. Tipovi listićavog grafita prema ASTM A 247: a) tip A, b) tip B, c) tip C, d) tip D, e) tip E [8,9]

3.3. Utjecaj kemijskog sastava na mikrostrukturu i svojstva sivog lijeva

Kvaliteta i svojstva sivog lijeva ovise o obliku, raspodjeli i veličini izlučenih grafitnih listića te strukturi metalne osnove. Kemijski sastav je važan faktor koji utječe na oblik grafita te strukturu metalne osnove. [8]

3.3.1. Utjecaj stalnih elemenata

U sivom lijevu ugljik se izlučuje u svom elementarnom obliku, tj. u obliku grafita. U uobičajenim kvalitetama sivog lijeva sadržaj ugljika kreće se u granicama od 2,9 do 3,8%.

Povećanje sadržaja ugljika povećava sklonost grafitizaciji, što rezultira smanjenjem mehaničkih svojstava odljevaka. Porastom sadržaja ugljika pada vlačna čvrstoća dok se poboljšava livljivost taljevine i smanjuje sklonost ka stezanju te stvaranju usahlina i naprezanja.

Silicij smanjuje topljivost ugljika u čvrstoj i tekućoj fazi, povećava difuziju ugljika pri svim temperaturama te promovira stvaranje grafita (djeluje kao grafitizator), odnosno otežava stvaranje karbida.

Cementit, lijevači ga često nazivaju odbjelom, je tvrd i krhak intermetalni spoj željeza i ugljika. Zbog visoke krhkosti cementit ima negativan utjecaj na vlačnu čvrstoću sivog lijeva. Isto tako, zbog visoke tvrdoće znatno otežava strojnu obradu odljevaka.

Mangan promovira stvaranje perlita i karbida. Mangan stabilizira austenit jer povećava topljivost ugljika u njemu. Najznačajnija uloga mangana u sivom lijevu je neutralizacija sumpora te formiranje stabilnih MnS uključaka. Stvaranje manganovog sulfida je povoljno zbog neutralizacije sumpora, koji ako nije neutraliziran manganom, ima niz štetnih utjecaja na strukturu i svojstva sivog lijeva.

Sumpor ima značajan utjecaj na nukleaciju i rast listićavog grafita. On smanjuje površinsku napetost taljevine željeznog lijeva, što potpomaže rast listićavog grafita te se zbog toga smatra da minimalna količina sumpora potrebna za dobivanje željene morfologije grafita iznosi 0,06%. Naime, MnS uključci djeluju kao potencijalna mjesta za

nukleaciju grafita. Sumpor, kao i mangan, sprječava grafitizaciju. Isto tako ima i negativan utjecaj na livljivost taljevine.

Fosfor stvara nisko topivi fosfidni eutektik, poznat kao steadit. Točka taljenja je niska i iznosi ~ 950 °C. Steadit, kao i karbidi, ima visoku tvrdoću što otežava strojnu obradivost odljevaka od sivog lijeva. Može se jedino eliminirati smanjenjem sadržaja fosfora u taljevini. Poželjan je samo kad je potrebna povećana otpornost na trošenje. Tada se dozvoljava do 1 % fosfora (npr. kočione papuče za vagone). Sadržajem $> 1,2\%$ fosfora može se uzrokovati niz negativnih posljedica: prekomjerna grafitizacija, rast feritnih zrna te izlučivanje fosfida. [8,9,12,14]

3.3.2. Utjecaj legirajućih elemenata

Obzirom da se legirajući elementi međusobno nadopunjuju u djelovanju, kombinacije pružaju širok spektar dobivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava.

Nikal djeluje kao grafitizirajući element. Ima visoku topivost u tekućem željezu, ali negativno utječe na topljivost ugljika. Kada je u količinama od 0,60 do 1,50 % nikal povećava čvrstoću i tvrdoću sivog lijeva. Često se primjenjuje u kombinaciji s ostalim legirnim elementima. Primjerice, u kombinaciji s vanadijem, značajno povišuje prokaljivost. Za razliku od ostalih elemenata za povećanje prokaljivosti (krom, vanadij, mangan, molibden), nikal (a i bakar) ne stvara karbide.

Krom je dvostruko učinkovitiji od nikla i bakra u povećanju vlačne čvrstoće sivog lijeva. Krom spada u grupu elemenata s vrlo visokom sklonosti ka stvaranju karbida (sprječava grafitizaciju). Pokazao se kao najefikasniji element za poboljšanje toplinske otpornost sivog lijeva, poglavito u kombinaciji s molibdenom.

Vanadij se obično dodaje u količinama do 0,35 % i značajno povećava tvrdoću i vlačnu čvrstoću sivog lijeva putem usitnjavanja grafita i perlita. Isto tako povišuje prokaljivost. Može se iskoristiti pojedinačno ili u kombinaciji s nekim drugim elementima u cilju poboljšavanja otpornosti na trošenje.

Molibden je jedan od najsvestranijih legirajućih elemenata za poboljšavanje mehaničkih svojstava sivog lijeva, zbog očvršćivanja metalne osnove i usitnjavanja grafitnih listića.

Povišuje prokaljivost, vlačnu čvrstoću, tvrdoću te otpornost na trošenje, puzanje i
Fakultet strojarstva i brodogradnje

toplinski umor sivog lijeva. Negativna mu je strana sklonost ka stvaranju karbida, ali u znatno manjoj mjeri od kroma. Stvara specijalne karbide bogate molibdenom.

Bakar je grafitizirajući element, povišuje vlačnu čvrstoću i tvrdoću sivog lijeva. Često se upotrebljava u kombinaciji s drugim elementima kako bi se ostvario snažniji efekt.

Kositar snažno promovira stvaranje perlita, ali ne utječe na njegovo usitnjavanje. Najčešće se primjenjuje dodatak od 0,04 do 0,1% kositra. Otežava grafitizaciju i ne promovira stvaranje karbida.

Antimon isto tako promovira stvaranje perlita i ne utječe na njegovo usitnjavanje. Prisutnost od 0,03 do 0,08% osigurava značajan porast dimenzijske i strukturne stabilnosti. [8,9,10]

Tablica 2. Utjecaj dodatka legirajućih elemenata na tvrdoću sivog lijeva u lijevanom stanju. Ispitni uzorci promjera 30mm lijevane u svježu kalupnu mješavinu. Sastav taljevine: 3,35% C, 2,10% Si, 0,65% Mn, 0,08% S i 0,04% P. Mikrostruktura u lijevanom stanju sastoji se od A tipa grafitnih listića i perlitne metalne osnove. [8]

Legirajući element	Tvrdoća, HB			
	Polazna taljevina	Dodatak 0,1% legirajućeg elementa	Dodatak 0,5% legirajućeg elementa	Dodatak 1,0% legirajućeg elementa
Molibden	205	210	230	255
Krom	205	209	225	245
Vanadij	205	215	255	-
Bakar	205	206	210	215
Nikal	205	207	211	217
Kositar	205	225	-	-

3.3.3 Utjecaj pratećih elemenata

Aluminij je grafitizirajući element koji poboljšava nukleacijski potencijal taljevine. Utječe na površinsku napetost taljevine željeznog lijeva, što za posljedicu ima osjetljivost na pojavu grešaka (mjehuravost). Sadržaj se mora osiguravati niskim zbog i to najbolje ispod područja gdje je opasnost za mjehuravost.

Titan kod malih dodataka djeluje kao grafitizator. Promovira stvaranje tipa D grafitnih listića. Ima visok afinitet prema dušiku tako da može neutralizirati njegovo djelovanje, potrebno je između 0,01 do 0,03%. Titan se spaja s dušikom i nastaju prividno ne štetni titanovi nitridi (TiN). Međutim, ako dušik nije u suvišku, titan se spaja s ugljikom i stvara titanove karbide (TiC) ili titanove karbonitride (Ti(CN)). Ti svi spojevi djeluju štetno na strojnu obradivost sivog lijeva.

Cerij ima negativan utjecaj na mikrostrukutru sivog lijeva. Promovira stvaranje vermikularnog i nodularnog grafita te povećava pothlađenje taljevine.

Olovo ima izrazito nepovoljan utjecaj na svojstva sivog lijeva. Već pri sadržaju 0,0005% olova dolazi do značajnog pada vlačne čvrstoće. [8,9]

3.4. Proizvodnja taljevine sivog lijeva

Proizvodnja taljevine sivog lijeva obuhvaća taljenje uložnih materijala i pripremu taljevine. Sama proizvodnja predstavlja važan korak u procesu proizvodnje kvalitetnih odljevaka od sivog lijeva. Metalurška kvaliteta taljevine ovisi o kvaliteti uložnog materijala, kontroli procesa taljenja, pripremi taljevine (odsumporavanje, predpriprema) te cijepljenju. [8,9]

3.4.1. Uložni materijali

Sirovo željezo je važan dio metalnog uloška za kontrolu kemijskog sastava. Ukoliko se primjeni sirovo željezo visoke čistoće u odgovarajućem udjelu, u ulošku je moguće smanjiti ukupni sadržaj mangana. Dodatak sirovog željeza u uložak utječe povoljno na nukleacijski potencijal taljevine. Specijalno sirovo željezo s visokim sadržajem ugljika, niskim sadržajem mangana, sumpora, fosfora i ostalih rezidualnih elemenata ima brojne pogodnosti za proizvodnju sivog lijeva (veće iskorištenje ugljika, veća kompaktnost uložnog materijala u peći, smanjenje koncentracije štetnih elemenata koji potječu od ostalih komponenti uloška). Udio u ulošku može varirati od nekoliko posto do više od 90%. To ovisi o brojnim faktorima: agregatu za taljenje, debljini stjenke odljevka, zahtijevanoj strukturi metalne osnove, zahtijevanim mehaničkim svojstvima, količini i kvaliteti ostalih komponenti uloška i udjelu povratnog materijala.

Čelični otpad upotrebljavan za proizvodnju željeznih ljevova s grafitom mora imati odgovarajuću kvalitetu, što znači nizak sadržaj rezidualnih elemenata. Upotreba

odgovarajuće količine čeličnog otpada u ulošku je prihvatljiva, čak i neophodna za sniženje ukupnog sadržaja ugljika i silicija u ulošku. Prekomjerni sadržaji nisu poželjni jer s porastom udjela raste i potrošnja koksa i električne energije za taljenje, produžuje se vrijeme trajanja taljevine, smanjuje se metalurška kvaliteta taljevine, raste opasnost od kontaminacije legirajućim elementima, javlja se potreba za naknadnom toplinskom obradom odljevaka i snažnije cijepljenje taljevine zbog slabijeg grafitizacijskog potencijala.

Povratni materijal unutar ljevaonice uključuje uljevne sustave, pojila i škartne odljevke. Udio povratnog materijala u ulošku varira od ljevaonice do ljevaonice i ovisi o raspoloživoj količini ovog materijala. Materijal je potrebno razvrstati po kemijskom sastavu i upotrijebiti za uložak ovisno o kvaliteti koja se proizvodi da bi se što bolje iskoristili legirajući elementi iz povratnog materijala.

Sredstva za pougljičavanje redovito se dodaju kao komponente uloška, te kao naknadni dodatak nakon taljenja u cilju podešavanja sadržaja ugljika u taljevini. Kao sredstva za naugljičavanje u indukcijskim pećima koristi se kristalinični grafit, komadi elektroda, petrol koks, sintetički grafit itd..Ukoliko je potrebno povišiti sadržaj ugljika i silicija u taljevini, prvo treba provesti naugljičavanje, a potom dodati sredstvo za povišenje sadržaja silicija.

Silicij-karbid sadrži ~30% ugljika i ~70% silicija i pogodno je sredstvo za naugljičavanje taljevine i povišenje sadržaja silicija u taljevini. Isto tako, iskorištenje ugljika i silicija iz silicij-karbida vrlo je visoko. Poboljšava metaluršku kvalitetu taljevine i povoljno utječe na nukleacijski potencijal taljevine. Dodatak silicij-karbida je ograničen na 1,0% mase metalnog uloška i dodaje se ranoj fazi taljenja, nikada u lonac. Prekomjerno dodavanje može dovesti do grešaka na odljencima, povećanog trošenja obloge peći i nagomilavanja na stjenkama peći.

Koks je sastavni dio uloška za kupolnu peć. Sagorijevanjem koksa oslobađa se toplina potrebna za zagrijavanje i taljenje uloška. Osim toga, ugljik iz koksa naugljičuje taljevinu. Potrebno je posebno paziti na sadržaj sumpora u koksu.

Ferolegure i ostali dodaci. Ferolegure se koriste za legiranje taljevine i dodaju se u peć ili lonac. Važno je poznavanje kemijskog sastava svake od dodanih legura. Kada se

zahtjeva legiranje taljevine silicijem ili samo povećanje sadržaja silicija u primarnoj taljevini primjenjuju se kvalitete FeSi koje nisu namijenjene za cijepljenje taljevine. Primjena FeSi namijenjene za cijepljenje (sadrži male količine aluminija i kalcija) nije ekonomski opravdana i može promijeniti nukleacijsko stanje primarne taljevine. [8,9,10,12]

3.4.2. Taljenje

Za proizvodnju taljevine sivog lijeva primjenjuju se slijedeći agregati:

- kupolna peć – predstavlja najekonomičniji agregat za taljenje, odnosno proizvodnju većih količina sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva
- indukcijska peć – agregat koji se sve više upotrebljava u ljevaonicama sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva zbog jednostavnosti proizvodnje, fleksibilnosti i mogućnosti proizvodnje taljevine s niskim sadržajem sumpora i rezidualnih elemenata
- elektrolučna peć – ne upotrebljava se u znatnijem opsegu u proizvodnji već spomenutih ljevova
- rotacijska peć – isto tako se ne upotrebljava u širem opsegu u proizvodnji gore navedenih ljevova.

3.5. Svojstva sivog lijeva

Mehanička i fizikalna svojstva sivog lijeva ovise o strukturi i kemijskom sastavu nastalom tijekom skrućivanja i naknadnog hlađenja u krutom stanju. Veličina i orijentacija grafitnih listića ima značajan utjecaj na svojstva sivog lijeva. Grafitni listići velike dužine, obično prisutni u sivim ljevovima s visokim ekvivalentom ugljika i debelostjenim odljevcima, rezultiraju dobrom sposobnošću prigušenja vibracija, dimenzijskom stabilnošću, otpornošću na toplinske šokove te olakšavaju strojnu obradivost. Ukoliko su u mikrostrukturi sivog lijeva prisutni sitni grafitni listići mogu se postići više vrijednosti vlačne čvrstoće i modula elastičnosti.

Pored kemijskog sastava (posebno ekvivalenta ugljika) i veličine poprečnog presjeka (debljine stijenke), na mikrostrukturu sivog lijeva (a time i svojstva) utječe dodatak legirajućih elemenata, toplinska obrada, toplinska svojstva kalupa te oblik odljevka. Kombinacijom raznih kemijskih sastava i kontrolom procesa mogu se dobiti različite mikrostrukture, odnosno različita svojstva.

U odnosu na nodularni i vermikularni lijev, sivi lijev ima nižu vlačnu čvrstoću, tvrdoću, izduženje i žilavost, ali povoljniju toplinsku vodljivost, sposobnost prigušenja vibracija i livljivost. [8,9,10,14]

3.5.1. Mehanička svojstva

Vlačna čvrstoća je najčešće ispitivano svojstvo sivog lijeva. Najznačajniji faktori koji utječu na vlačnu čvrstoću sivog lijeva su: kemijski sastav (posebno vrijednost ekvivalent ugljika), veličina i raspodjela grafitnih listića te struktura metalne osnove. Uobičajenom, nelegiranom sivom lijevu, vlačna čvrstoća se kreće od 100 do 450 MPa.

Grafitni listići imaju negativan utjecaj na vlačnu čvrstoću, djeluju kao zarezi u metalnoj osnovi, odnosno mjesta smanjene čvrstoće i tvrdoće. Sivi lijev s nižom vrijednosti ekvivalenta ugljika ima višu čvrstoću od onog s nižom zbog manjeg udjela grafitnih listića, manje dužine grafitnih listića.

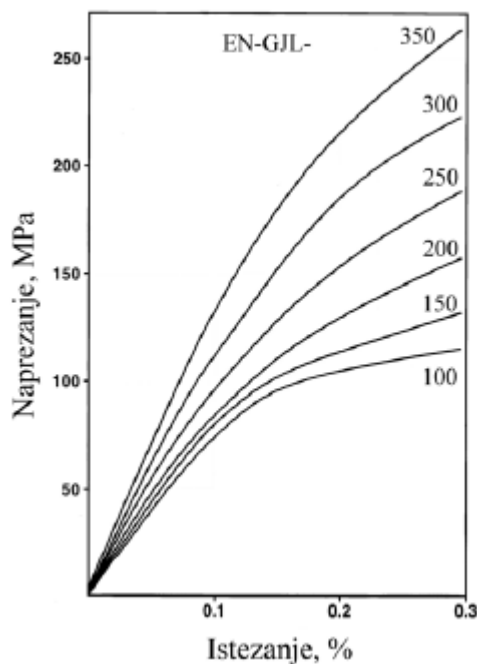
Tlačna čvrstoća sivog lijeva je 3-4 puta veća od njegove vlačne čvrstoće. Upravo zbog prisutnih grafitnih listića u metalnoj osnovi sivog lijeva je tlačna čvrstoća toliko veća, jer grafitnih listići imaju manji utjecaj na vlačna nego na tlačna svojstva.

Smična čvrstoća sivog lijeva je ~1,1-1,3 puta veća od vlačne čvrstoće.

Savojna čvrstoća obično je ~1,5 puta veća od vlačne čvrstoće.

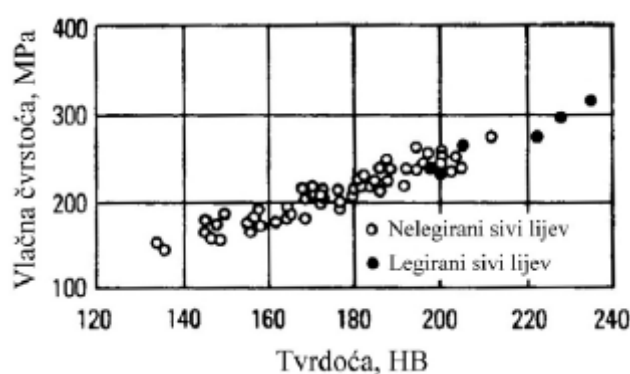
Modul elastičnosti kod sivog lijeva nije konstanta kao kod većine materijala jer kod sivog lijeva nije prisutno elastično područje u kojem su naprezanje i istezanje u proporcionalnom odnosu. Za razliku od većine materijala, modul elastičnosti sivog lijeva raste s porastom vlačne čvrstoće. Porastom dužine grafitnih listića i povećanjem njihovog udjela u mikrostrukturi smanjuje se modul elastičnosti sivog lijeva. Sivi ljevovi s nižim modulom elastičnosti bolje apsorbirati vibracije i buku u odnosu na one s višim modulom elastičnosti. Isto tako posjeduje višu otpornost na oštre toplinske šokove. Zbog toga je sivi lijev koji ima visok modul elastičnosti pogodniji za izradu kočionih diskova i bubnjeva te potisnih ploča kvačila. Dakle, viši moduli elastičnosti pogodniji su tamo gdje se zahtjeva krutost konstrukcije. [10,12]

Na slici 13 je prikazana krivulja naprezanje-istezanje za različite kvalitete sivog lijeva.



Slika 13. Krivulja naprezanje - istezanje za različite kvalitete sivog lijeva [8]

Tvrdoća sivog lijeva često se ispituje jer se na temelju izmjerene tvrdoće može procijeniti vlačna čvrstoća i strojna obradivost. Na slici ispod se može vidjeti da tvrdoća sivog lijeva raste s porastom vlačne čvrstoće.



Slika 14. Odnos vlačne čvrstoće i tvrdoće kod različitih kvaliteta sivog lijeva [8]

Najnepovoljnije svojstvo sivog lijeva je njegova vrlo niska duktilnost, koja je povezana s njegovom mikrostrukturom. Niska duktilnost očituje se u niskoj udarnoj žilavosti i istežanju sivog lijeva. Žilavost sivog lijeva raste s porastom vlačne čvrstoće.

Sivi lijev posjeduje vrlo malu osjetljivost na zarez. Dakle, čvrstoća će se vrlo malo smanjivati ukoliko su na odljevku prisutna razna zaobljenja, utori ili otvori, što se objašnjava prisutnošću grafitnih listića koji djeluju kao zarezi u metalnoj osnovi.

Sivi lijev posjeduje visoku sposobnost prigušenja vibracija, što je rezultat povezanih grafitnih listića u metalnoj osnovi. Odljevci sivih ljevova povišene čvrstoće s malim udjelom te kratkim grafitnim listićima imaju znatno nižu sposobnost prigušenja vibracija od onih odljevaka s nižom čvrstoćom s visokim ekvivalentom ugljika te izduženim i grubim grafitnim listićima. Zbog visoke sposobnosti prigušenja vibracija često se od odabiru odljevci sivog lijeva za izradu blokova i glava motora, postolja strojeva itd. [8,9,10]

3.5.2. Fizikalna svojstva

Gustoća sivog lijeva ovisi o kemijskom sastavu i strukturi. Povećanjem udjela slobodnog grafita (koji ima nisku gustoću), smanjuje se gustoća sivog lijeva. Zato sivi ljevovi s povišenom čvrstoćom imaju višu gustoću od onih s nižom čvrstoćom.

Sivi lijev zbog kontinuirane prirode grafitnih listića ima veću toplinsku vodljivost nego nodularni i vermikularni lijev. Što je veća količina grafita i što su oni grublji i duži, veća je toplinska vodljivost sivog lijeva. Većina legirajućih elemenata smanjuje toplinsku vodljivost sivog lijeva, osobito silicij. S porastom udjela ferita povećava se toplinska vodljivost.

Toplinska ekspanzija sivog lijeva ovisi o koeficijentu linearne ekspanzije. On primarno ovisi o metalnoj osnovi, dok oblik grafita ima zanemariv utjecaj. [8,9]

3.6. Legirani sivi ljevovi

Legirani sivi ljevovi obuhvaćaju feritne (visok sadržaj silicija ili aluminijsa) i austenitne (visok sadržaj nikla) sive ljevove. Oni se primjenjuju tamo gdje nije moguće primijeniti sive ljevove uobičajene kvalitete. Oni posjeduju karakteristična svojstva (prije svega otpornost na koroziju i otpornost na djelovanje visokih temperatura) i razvijeni su za specifična područja primjene. [8,9]

3.6.1. Sivi ljevovi legirani silicijem

Sive ljevove legirane silicijem možemo razvrstati u dvije grupe. Legiranje sivog lijeva silicijem u količinama od 4-6% značajno se povećava njegova otpornost na djelovanjem povišenih temperatura. Legiranjem sivog lijeva u količinama od 14-16% značajno se povećava otpornost na koroziju. [8,9]

3.6.1.1. Sivi ljev legiran silicijem namijenjen za rad na povišenim temperaturama

Obično sadrži 2,3% ugljika, 4-6% silicija, 0,5-0,8% mangana, <0,1% sumpora, <0,25 fosfora te 0,2% titana i naziva se Silal. Dodatkom do 2% kroma može se poboljšati oksidacijska otpornost, a isto tako i mehanička svojstva. Relativno se dobro strojno obrađuje, zbog svoje krhkosti i niske čvrstoće potrebno je rukovanje s posebnom pažnjom.

Silal je otporan na oksidaciju, rast i toplinski umor pri visokim temperaturama do najmanje 800° (moguća primjena i do 900°), što je prvenstveno radi povišenog sadržaja silicija. [8,9]

3.6.1.2. Sivi ljevovi legirani silicijem otporni na koroziju

Najčešće sadrže 14-16% silicija i čine jedinstvenu grupu sivih ljevova otpornih na koroziju. Različiti trgovački nazivi npr. Durion (SAD); Ironak (Eng); Termsil, Eksilid, Azidur (Ger) itd.. Svi su približno istog kemijskog sastava. Visokom otpornost na koroziju potiče od gustog zaštitnog oksidnog sloja na površini odljevaka, što je rezultat visokog sadržaja silicija (vrlo dobra otpornost na razne kiseline i lužine). Vlačna čvrstoća im je vrlo niska, dok je tvrdoća visoka, zbog toga je vrlo nepogodan za strojnu obradu. Ovaj materijal ima vrlo nisku toplinsku vodljivost i povećanu sklonost ka stezanju. Otporni su na koroziju u svim kiselinama osim u fluorovodičnoj i sulfidnoj kiselini. Posebno možemo istaknuti visoku korozijsku otpornost na sumpornu kiselinu kod svih koncentracija i temperatura (najviša otpornost se postiže kod 16,5% silicija). Zbog toga se ovi ljevovi široko primjenjuju u kemijskoj industriji za obradu i transport visokokorozivnih tekućina. Povećanjem silicija iznad 17% ne donosi povećanje antikorozivnosti, ali značajno se povećava krhkost. Isto tako, povećanim sadržajem ugljika se smanjuje korozijska otpornost, dok premali sadržaji ugljika vode povećanoj krhkosti i stezanju. Optimalan sadržaj ugljika je 0,5-0,6%. [8,9]

3.6.2. Sivi ljevovi legirani niklom

Sadržaj nikla (snažan stabilizator austenita) u ovim materijalima se kreće od 12,0-36%. Poznati je pod trgovačkim nazivom Ni-resist. Kako bismo povećali mehanička svojstva sivog lijeva legiranog niklom dodaje se krom u količinama od 5,5-6%. Glavna svojstva ovog materijala su:

- stabilnost te otpornost na koroziju pri visokim temperaturama
- otpornost na koroziju u kiselinama (osim dušične i solne kiseline), lužinama i solima
- dobra čvrstoća
- otpornost na trošenje
- niska toplinska ekspanzija
- nemagnetičnost
- dobra livljivost i strojna obradivost.

3.6.3. Sivi ljevovi legirani aluminijem

Sivi ljevovi legirani aluminijem rezultiraju značajnim poboljšanjem otpornosti na visoke temperature, korozijske otpornosti, otpornosti na habanje i nemagnetičnosti. Možemo ih podijeliti u dvije skupine. Prvu skupinu čine feritni sivi ljevovi sa 1-7% aluminija, gdje aluminij zamjenjuje silicij kao grafitizirajući element. Drugu skupinu čine feritni sivi ljevovi s 18-25% aluminija. Sadržaji ljevova koji se nalaze između ove dvije skupine rezultiraju stvaranjem bijelih željeznih ljevova i nemaju komercijalnu primjenu.

Povećanjem sadržaja aluminija se povećava otpornost sivih ljevova na visoke temperature, ali se mehanička svojstva značajno pogoršavaju i ljevovi postaju krhki. Aluminijem legirane sive ljevove vrlo je teško odliti bez uključaka troske i hladnih zavora. Aluminij je vrlo reaktivan i lako reagira s kisikom i vlagom pri temperaturama rastaljenog sivog lijeva. Potrebno je paziti da oksidni sloj nastao tijekom ljevanja ne uđe u kalup, jer se tako stvaraju uključci.

Sivi ljevovi legirani aluminijem mogu se primijeniti za gradnju komponenti koje se primjenjuju kod povišenih temperatura, a u radu nisu podvrgnute mehaničkom opterećenju. Loša mehanička svojstva, izrazita krhkost i loša livljivost značajno su ograničili primjenu ovih ljevova. [8,9]

3.7. Kontrola kvalitete

U svim fazama u procesu proizvodnje potrebno je provesti striktnu kontrolu kako bi se osigurala ponovljivost procesa. Posebna pažnja usmjerena je na uložne materijale koji moraju zadovoljiti definirane značajke.

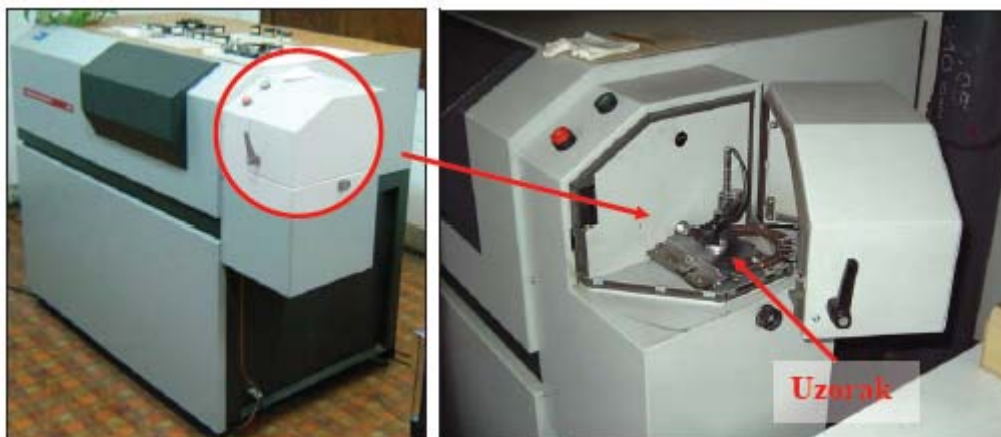
3.7.1. Kontrola kvalitete taljevine

Najvažnija svojstva rastaljenog sivog lijeva jesu :

- kemijski sastav;
- mehanička svojstva;
- temperatura;
- livljivost.

Kemijski sastav obično se kontrolira u laboratoriju kompletnom kemijskom analizom gravimetrijskim i volumetrijskim metodama ili spektrografskom metodom, npr. pomoću kvantometra. Kemijski sastav može se odrediti približno u pogonu pomoću klinaste probe ili određivanjem ekvivalenta ugljika snimanjem krivulje hlađenja. Postoje digitalni aparati koji na osnovu krivulje hlađenja daju sadržaj ugljika i silicija u lijevu.

Na slici 15 je prikazan spektrometar, uređaj za određivanje kemijskog sastava.



Slika 15. Spektrometar za određivanje kemijskog sastava [8]

Temperatura rastaljenog lijeva može se mjeriti optičkim ili uronjivim pirometrom.

Livljivost sivog lijeva ovisi o kemijskom sastavu, u prvom redu o sadržaju C, Si i P te o temperaturi lijeva. S obzirom na livljivost povećanju od 0,1% C ekvivalentno je povećanje od 0,3% Si ili 0,2% P ili povišenje temperature od 15-20 °C. Livljivost se određuje pomoću spiralne ili zvjezdaste probe. [8,9,12]

3.7.2 Kontrola kvalitete odljevaka

Neke od metoda koje se koriste za provjeru ispravnosti odljevaka i sukladnosti sa zahtijevanim odredbama jesu ispitivanje mehaničkih svojstava, dimenzijske točnosti, ultrazvučno ispitivanje, ispitivanje pod tlakom itd..

Ispitivanje mehaničkih svojstava sivog lijeva obuhvaća ispitivanje vlačne čvrstoće i tvrdoće. Uzorci za ispitivanje se dobivaju od odvojeno lijevanih uzoraka strojnom obradom. [8,9]

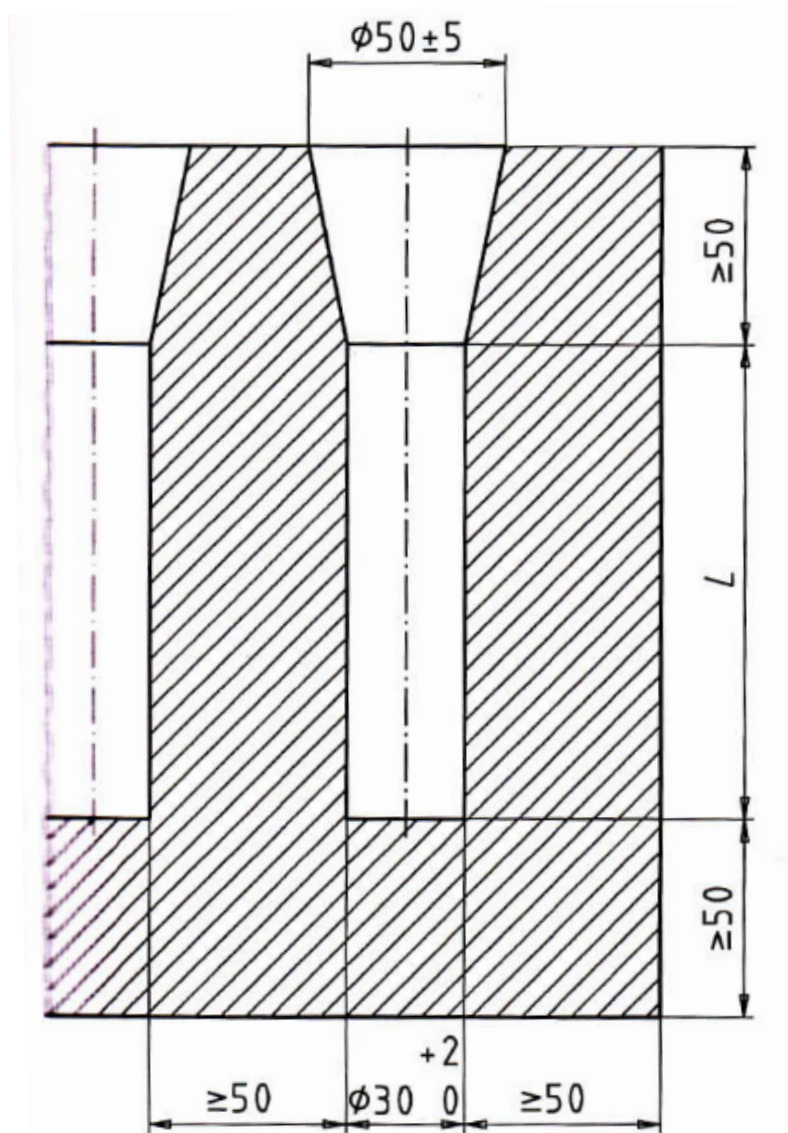
4. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu ovog rada ispitan je sivi lijev EN-GJL200 (SL20). Na odljevku su provedena sljedeća ispitivanja:

- metalografska ispitivanja,
- mehanička ispitivanja.

Eksperimentalni dio ovog rada proveden je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu te tvrtki Ferro-Preis d.o.o. u Čakovcu.

Za potrebe ispitivanja, izrađeni uzorci lijevani su u pješčane kalupe s furanskim vezivom. Slika 16 prikazuje presjek uzorka prema kojoj je izrađen kalup.



Slika 16. Prikazuje presjek uzorka kalupa

Odljevke je proizvela ljevaonica Ferro-Preis d.o.o. Čakovec.

Na slici 17 i 18 prikazan je kalup prije ulijevanja taljevine te na slici 19 kalup nakon ulijevanje taljevine.



Slika 17. Prikaz kalupa



Slika 18. Prikaz kalupa



Slika 19. Kalup nakon ulijevanja taljevine

4.1. Vizualna kontrola

Na slici 20 označeno je mjesto gdje je uzorak rezan za ispitivanje tvrdoće i mikrostrukture.



Slika 20. Prikaz mjesta gdje je rezan uzorak

4.2. Metalografska ispitivanja

Metalografska ispitivanja svjetlosnim mikroskopom izvršena su u Laboratoriju za materijalografska ispitivanja, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

4.2.1. Priprema uzoraka

Prije ispitivanja svjetlosnim mikroskopom izdvojeni uzorci pripremljeni su standardnim postupkom.

Dimenzije uzoraka: $\Phi 20 \times 10$ mm.



Slika 21. Izdvojeni uzorak za ispitivanje

Standardni postupak pripreme uzoraka:

- brušenje
- poliranje
- nagrivanje.

Brušenje uzorka vršeno je na stroju „Phoenix Alpha – grinder/polisher“ proizvođača Buehler (slika 22). Brušenje je izvedeno voodootpornim brusnim papirima s brusnim zrnima od silicijevih karbida u četiri koraka s izmjenama papira: - P320

- P600

- P1200

- P2400.

Nakon svake izmjene papira, uzorci su zakretani za 90° radi uklanjanja tragova prethodnog brušenja.

Brušenje je vršeno pri 300 okr/min, a kao sredstvo za hlađenje korištena je voda.

Slika 22 prikazuje stroj za brušenje uzoraka.



Slika 22. Stroj za brušenje uzoraka

Prije poliranja, uzorci su očišćeni u ultrazvučnoj čistilici (slika 23).



Slika 23. Ultrazvučna čistilica

Poliranje ispitnih uzoraka obavljeno je uređajem „Struers DAP-V“. Korištena je tkanina „MD – MOL“ i dijamantne paste proizvođača Buehler. Poliranje je vršeno pri 150 okr/min, a kao sredstvo za hlađenje korištena je tekućina „DP – Lubricant Red“.

Slika 24 prikazuje uređaj za poliranje uzoraka.



Slika 24. Uređaj za poliranje

4.2.2. Ispitivanje mikroskopom

Za metalografska ispitivanja uzoraka korišten je svjetlosni mikroskop „Olympus 6X S1“ (slika 25) sa mogućnošću povećanja 50x do 1000x.



Slika 25. Svjetlosni mikroskop

Mikroskop je opremljen kamerom i povezan s računalom (slika 26).



Slika 26. Mikroskopski prikaz na računalu

4.3. Ispitivanje tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće uzorka je obavljeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Tvrdomjer:

- proizvođač: VEB Werkstoffprufmaschinen, Njemačka;
- serijski broj / oznaka: 33/50 /345
- mjerna metoda: Brinell – HB 2,5/187,5 (kuglica promjera 2,5 mm, opterećenje 187,5 kp, tj. 1839 N).

Na slici 27 prikazan je tvrdomjer na kojem je očitana tvrdoća uzorka.



Slika 27. Tvrdomjer za ispitivanje tvrdoće uzorka

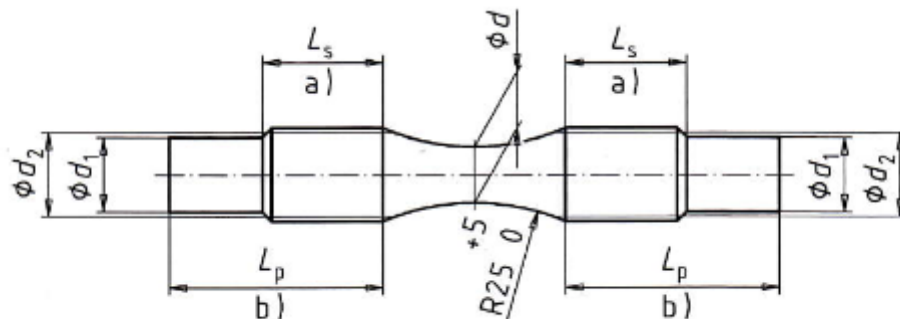
Ispitivanje:

- metoda: Brinell – HB 2,5/187,5
- u skladu s normom HRN EN ISO 6506-1:2008;
- broj uzoraka: 1;
- broj otisaka po uzorku: 5;
- temperatura tijekom ispitivanja: 23 ± 2 °C.

4.4. Ispitivanje čvrstoće

Ispitivanje čvrstoće uzoraka provedeno je u tvrtki Ferro-Preis d.o.o. u Čakovcu prema normi HRN EN 1561.

Na slici 28 prikazan je uzorak iz norme EN 1561 sa dimenzijama $d_1=20\text{mm}$.

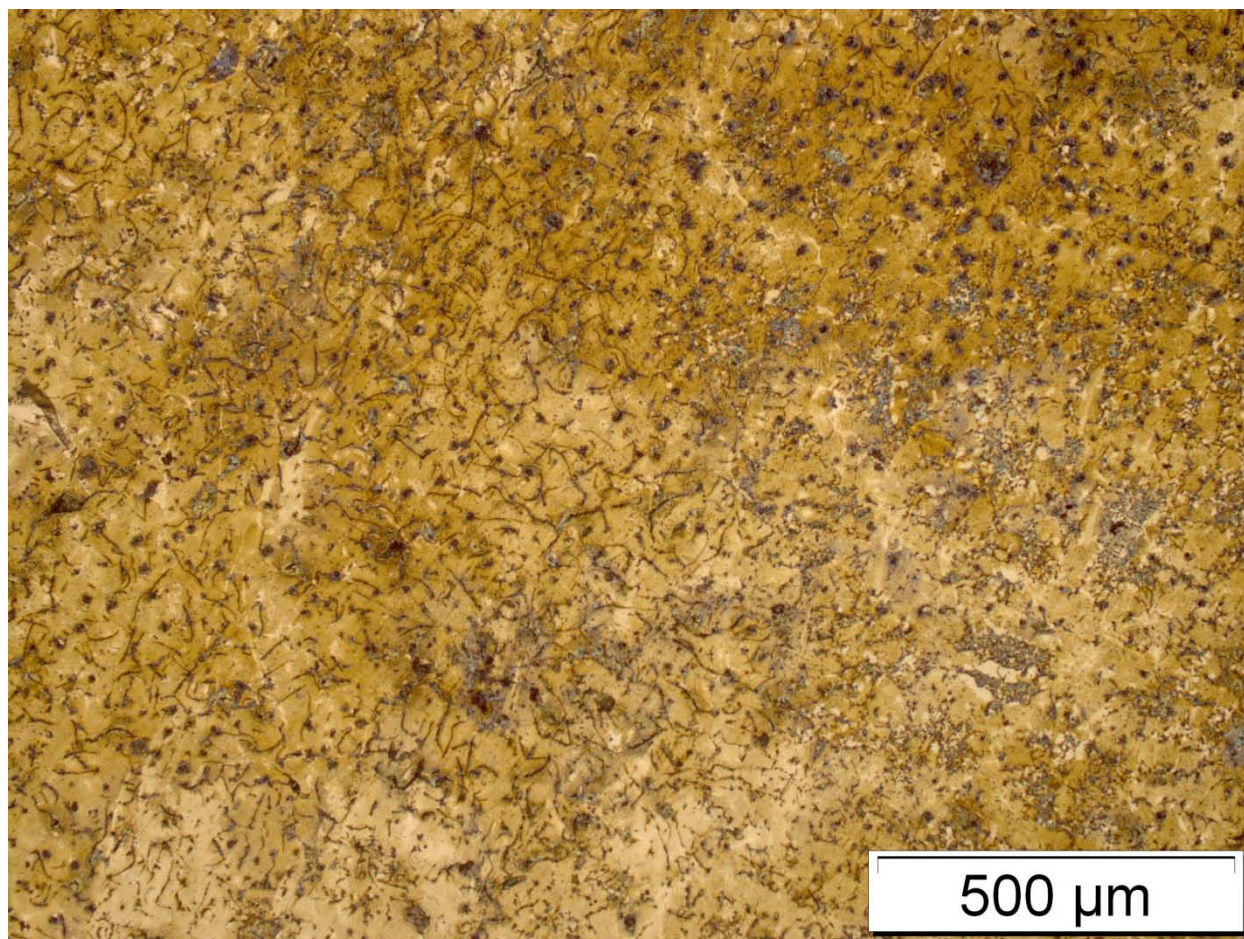


Slika 28. Uzorak iz norme EN 1561 sa dimenzijama $d_1=20\text{mm}$

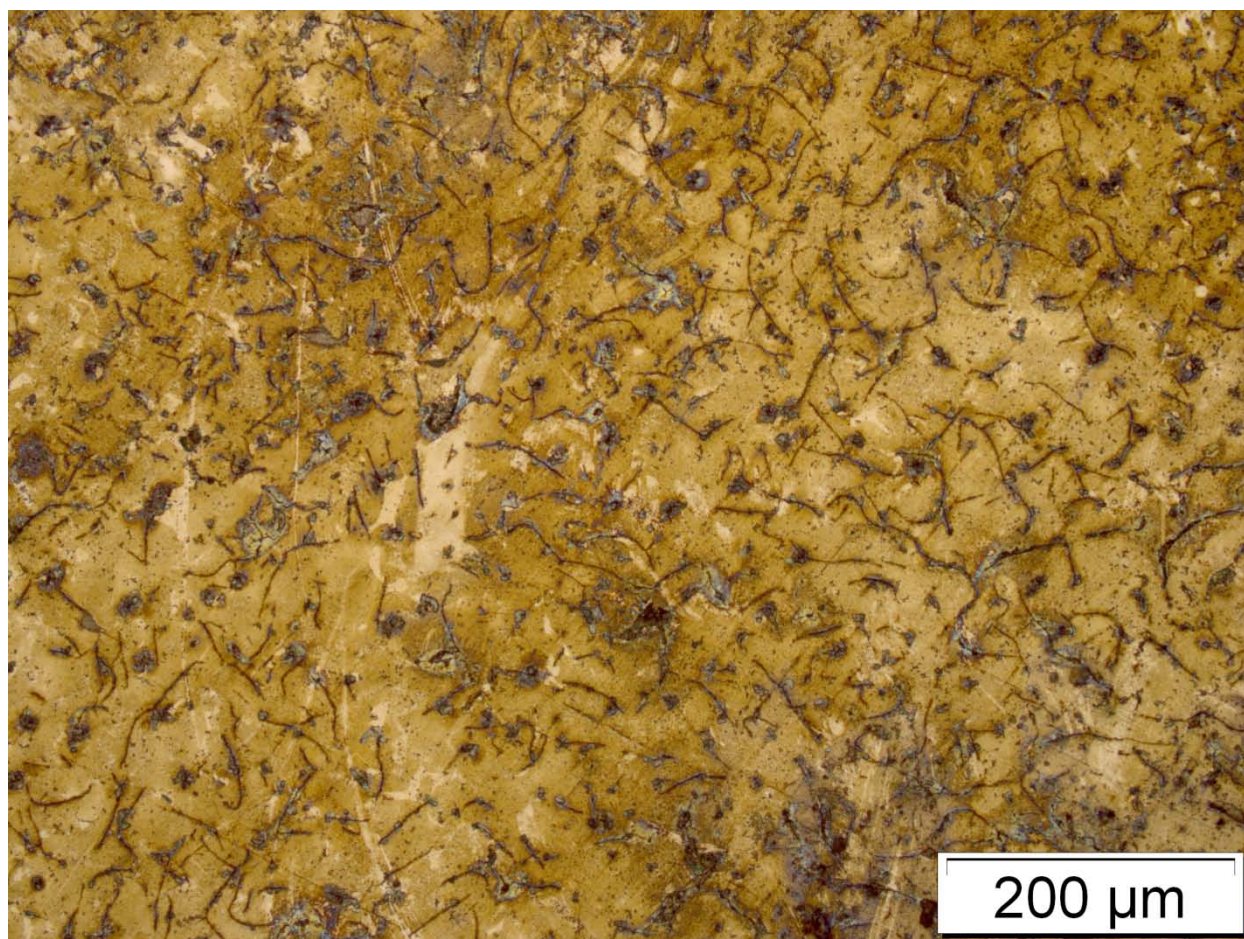
5. REZULTATI ISPITIVANJA

5.1 Rezultati metalografskih ispitivanja

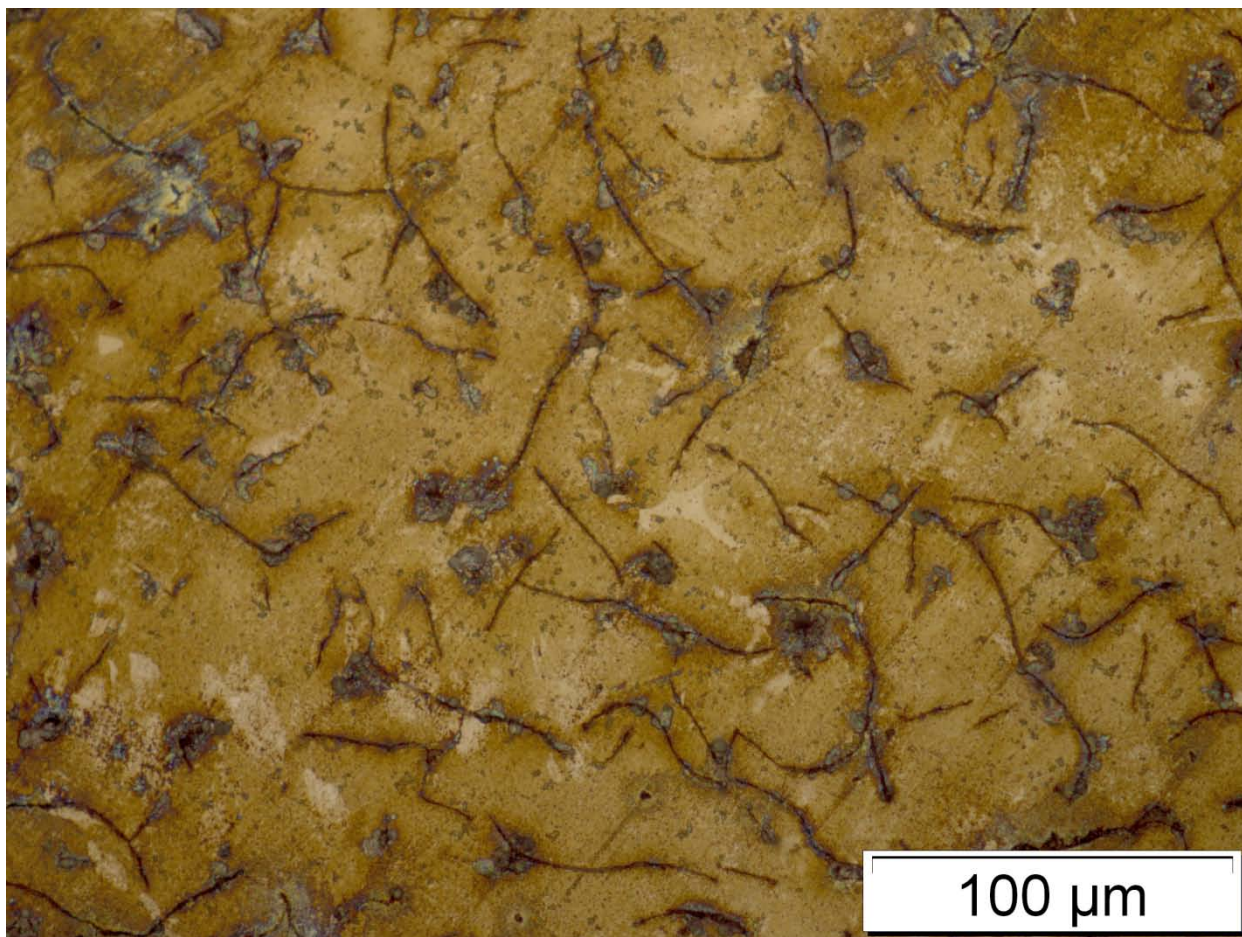
Pregledom ispitnih uzoraka svjetlosnim mikroskopom, dobivene su sljedeće snimke mikrostrukture:



Slika 29. Mikrostruktura sivog lijeva EN-GJL-200 (povećanje 100x)



Slika 30. Mikrostruktura sivog lijeva EN-GJL-200 (povećanje 200x)



Slika 31. Mikrostruktura sivog lijeva EN-GJL-200 (povećanje 500x)

Iz dobivenih mikrostruktura vidi se da je ugljik izlučen u obliku listića. Struktura sivog lijeva je feritno-perlitna.

5.2. Rezultati ispitivanja tvrdoće

Rezultati ispitivanja tvrdoće prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Prikaz rezultata ispitivanja tvrdoće uzoraka

Redni broj otiska	Dijagonala d1, [mm]	Dijagonala d2, [mm]	Srednja duljina dijagonale, [mm]	Tvrdoća – [HB] 2,5/187,5
1	1,0739	1,0641	1,0690	198,9
2	1,0608	1,0380	1,0494	206,8
3	1,0201	1,0133	1,0167	221,0
4	1,0107	1,0085	1,0096	224,3
5	1,0447	1,0344	1,0396	211,0
Aritmetička sredina izmjerenih vrijednosti, HB 2,5 /187,5				212,4

Prema rezultatima tvrdoće iz norme EN 1561 vidi se da je to materijal EN-GJL-200 (SL 20).

5.3. Rezultati ispitivanja čvrstoće

Na slici 32 prikazan je uzorak nakon ispitivanja čvrstoće.



Slika 32. Prikaz uzorka nakon ispitivanja čvrstoće

Na slici 33 dan je prikaz uzorka nakon ispitivanja čvrstoće.



Slika 33. Prikaz uzorka nakon ispitivanje čvrstoće

Ljevaonica Ferro-Preis d.o.o iz Čakovca dostavila nam je sljedeće rezultate.

Vlačna čvrstoća iznosi: $R_m=216,97 \text{ N/mm}^2$

Na temelju provedenih ispitivanja mikrostrukture, čvrstoće i tvrdoće sa sigurnošću se može zaključiti da se radi o sivom lijevu GJL-200 (SL 20).

6. ZAKLJUČAK

Sivi lijev pripada skupini željeznih lijevova kod kojih je ugljik izlučen u obliku grafita. Zbog grafitne listićave strukture ima nisku vlačnu čvrstoću, tvrdoću, žilavost, istezanje i modul elastičnosti te povećanu osjetljivost na debljinu stjenke. Pozitivne strane sivog lijeva su: dobra strojna obradivost, visok stupanj prigušenja vibracija, otpornost na toplinske šokove, izvanredna livljivost te tlačna čvrstoća i ekonomičnost.

Tipična područja primjene sivog lijeva su: strojogradnja, odljevci za peći i štednjake, konstrukcije, industrija motornih vozila i još mnoga druga područja.

Taljevina se proizvodi u kupolnim i indukcijskim pećima.

Prije lijevanja, za svaku taljevinu, izvodi se uzimanje uzoraka za ispitivanje kvalitete materijala.

U radu je provedeno određivanje mikrostrukture, čvrstoće i tvrdoće taljevine željeznog lijeva dobivenog u kupolnoj peći. Iz mikrostrukture, tvrdoće u rasponu od 198,9 do 224,3 HB i čvrstoće $R_m=216,97 \text{ N/mm}^2$ sa sigurnošću se može zaključiti da se radi o sivom lijevu GJL-200 (SL 20), kod kojeg je ugljik izlučen u obliku listića.

Literatura

- [1] Bonačić Mandinić; Z.; Budić, I.: Osnove tehnologije kalupljenja, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2001.
- [2] dostupno na: <http://www.forum.hr/showthread.php?p=22956531> (5.9.2012.)
- [3] Unkić, F; Glavaš Z.: Osnove lijevanja metala, Zbirka riješenih zadataka, Sisak, 2009.
- [4] Katavić, I.: Ljevarstvo, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka, 2001.
- [5] dostupno na: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8d/BMW_6-cylinder_block_Al-Mg.jpg (4.9.2012.)
- [6] dostupno na:
http://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/20_10_2011__15683_ljevarstvo-2011.pdf (8.9.2012.)
- [7] dostupno na:
http://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/15_02_2010__11943_ljevarstvo-proiz-post-2009.pdf
- [8] Unkić, F; Glavaš Z.: Lijevanje željeznih legura, Sisak, 2008.
- [9] Ljevački priručnik, Savez ljevača Hrvatske, Zagreb, 1985.
- [10] Filetin T., Kovačiček F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Zagreb, 2009.
- [11] Živković D.: Lijevanje metala, Split, 2007.
- [12] Zeljko S.: Utjecaj kemijskog sastava na temperaturnu stabilnost sivog lijeva, Sisak, 2011.
- [13] HRN EN 1561:1997 – Hrvatska norma – Ljevarstvo – sivi ljevovi
- [14] Fugal T, Goodrich G.M., Paterisson V., Mroczek M., Ward J., Goodrich G., Callison C., Bhaskaran C.A., Helm L., Shturmakov A., Way J.: Introduction to Gray Cast Processing, American Foundry Society, Des Plaines, Illinois, SAD 2000.